

Influencia de los cambios de ocupación del suelo de Cali (Colombia), entre 1984 y 2003, en la temperatura de superficie

Luis M. Santana^{1§}, Luis A. Escobar², Paolo A. Capote³

^{1§} *Departamento de Geografía Universidad del Valle, Cali, Colombia,
luis.santana@correounivalle.edu.co.*

² *Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
luis.escobar@correounivalle.edu.co*

³ *Departamento de Geografía de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.*

(Recibido: Abril 5 de 2010 Aceptado: Febrero 15 de 2011)

Resumen

Del análisis de imágenes de satélite Landsat se encontró que, entre 1984 y 2003, Cali (Colombia), experimentó un aumento del 29% en el área construida, en detrimento de áreas en pastos, rastrojos, cultivos y zonas arboladas. Estos cambios han generado, entre otros impactos, modificación en los procesos de transferencia de energía a la atmósfera, con la consecuente expansión de la isla de calor. Se encontró, además, que la temperatura de superficie (T_s) de la ciudad aumentó 3.76 grados centígrados en promedio, incremento que se propagó a barrios de las partes central, oriental y norte y que determina el crecimiento de la isla de calor. Los resultados de modelos de regresión aplicados concluyen que el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), junto con el área construida, tiene mayor sensibilidad que el índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) para explicar el aumento de la temperatura de superficie, por cuanto el primero capta no sólo la actividad de los tejidos del follaje, sino la reflectividad del suelo. Las estimaciones discriminan cuál es la contribución del aumento del área construida y de la disminución de SAVI en la explicación del incremento de T_s , para toda la ciudad y para las distintas comunas.

Palabras clave: Colombia, Islas de calor urbano, Imágenes Landsat, Indicadores ambientales, Calidad ambiental urbana

ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Impact of land use changes in Cali, city, between 1984 and 2003, on land surface temperature

Abstract

Analyzing Landsat satellite images find that between 1984 and 2003 Cali's (Colombia) urban area increased 29% built-up area (3.473 hectares), in detriment of areas in pastures, bushes, crops and woodland. These changes have impacted, among other, for processes of energy transfer between land and atmosphere, with the consequent expansion of an urban heat island. We found, also, that surface's temperature in Cali increased 3.76 Celsius on average, an increase spreading to neighborhoods of the central, eastern and northern parts of the city and which determines the growth of the heat island. Results from regression models applied conclude that the soil adjusted vegetation index (SAVI), along with built-up area, is more sensitive than the normalized difference vegetation index (NDVI) to explain the increase of surface temperature, due to the first captures not only the activity of the tissues of the foliage, but the reflectivity of the ground. Finally, the research shows the contribution of increase in built-up area as well as the decrease of the SAVI index to explain the raise in surface temperature, both for the entire city, and for separate administrative units that Cali is divided.

Keywords: Colombia, Urban heat island, Landsat imagery, Environmental indicators, Urban environmental quality

1. Introducción

De acuerdo con las Naciones Unidas, para el 2005, el 75% de la población de América Latina vivía en áreas urbanas, proporción que se ha venido incrementando con el paso del tiempo (ONU-CEPAL, 2007). Así, el desarrollo urbano, el tipo de cambio de ocupación de la tierra más importante en la historia humana, tiene un gran impacto sobre el ambiente (Lo & Quattrochi, 2003; Zha *et al*, 2003; Weng & Yang, 2004), ya que genera una reducción de la evapotranspiración y calidad del aire y agua, y un aumento de los niveles de escorrentía superficial (Wilson *et al*, 2003). La conversión de áreas con pastos, rastrojos y árboles en edificios, casas, vías, estructuras metálicas y otras superficies impermeables, hacen que las zonas urbanas tengan una mayor capacidad de absorción de radiación solar y mayor capacidad termal y conductividad que las áreas rurales circundantes, lo que ocasiona que el calor sea almacenado durante el día y liberado durante la noche (Weng, 2001; Weng & Yang, 2004; Rosenweig *et al*, 2005). Esto determina que en las ciudades aparezca el fenómeno de islas de calor urbano (UHI, por sus siglas en Inglés), aspecto ampliamente estudiado en los últimos años (Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003; Pongracz *et al*, 2003; Chen *et al*, 2006).

Las UHI fueron estudiadas inicialmente por medio de los datos medidos en las estaciones climáticas presentes en las ciudades, aunque como es conocido la cantidad y densidad de estas es muy baja, posteriormente mediante transectos tomados por medio de automóviles dotados de termómetros (Tran *et al*, 2006; Voogt & Oke, 2003). En las últimas dos décadas, sin descartar los transectos, el uso de imágenes de satélite para estudiar las islas de calor urbano es cada vez más destacada y frecuente (Voogt & Oke, 2003), como consecuencia de los progresos en la resolución espacial y temporal y porque éstas, contrario a los datos puntuales recolectados en las estaciones climáticas, captan información del área completa de barrido según el tamaño de píxel o resolución espacial.

De otro lado, el aumento de la densidad de población induce, normalmente, a una intensificación del transporte urbano y actividad

industrial, lo que conlleva un aumento en el consumo de energía y materias primas (Pongracz *et al*, 2006), acciones que al mismo tiempo contribuyen a incrementar la temperatura y emisión de partículas contaminantes. Mayores temperaturas resultan, generalmente, en un aumento del ozono troposférico y del consumo de energía eléctrica, por las mayores demandas de aire acondicionado (Weng & Yang, 2004). En definitiva, los anteriores aspectos, mal gestionados, tienen consecuencias negativas sobre el paisaje urbano, recursos biológicos, y sobre la salud y calidad de vida de los pobladores de las ciudades (Wilson *et al*, 2003).

Frente a los componentes meramente físicos de la ciudad, la vegetación es un elemento importante en el ambiente urbano, por cuanto tiene un impacto directo sobre el flujo de energía, evapotranspiración, circulación del aire y temperatura de superficie (Miller y Small, 2003). Repercute positivamente en las ciudades por medio de la absorción y reflejo selectivo de la radiación solar incidente, por la regulación e intercambio del calor latente, por el embellecimiento estético (Wilson *et al*, 2003); también por su capacidad para purificar el agua y aire, filtrar el viento y ruido y proveer servicios psicológicos (Chiesura, 2004).

El uso de imágenes de satélite es la alternativa más útil y eficiente en la elaboración de cartografía de la vegetación y otras clases de ocupación del suelo a diferentes escalas, y muestra de ello es la enorme cantidad de trabajos e investigaciones realizadas sobre esta temática a nivel global, regional y local. Se trata, sin duda, de una herramienta poderosa para estudiar la ocupación del suelo y sus cambios en el ámbito urbano (Mesev, 1998; Small, 2002; Wilson *et al*, 2003; Hu *et al*, 2007; Hu & Lo, 2007; Martinuzzi *et al*, 2007), utilizando diferentes técnicas de procesamiento digital de las imágenes.

Son muchos los esfuerzos realizados, a través de imágenes de satélite, para obtener cartografía de vegetación usando índices de vegetación (Chuvieco, 2002). Sin embargo, uno de los más

comúnmente utilizados es el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI), el cual resalta la diferencia de reflectividad de energía entre el infrarrojo cercano y rojo por parte de la vegetación verde. La relación entre el NDVI y la temperatura de superficie, ha sido ampliamente documentada en la literatura (Weng *et al*, 2004; Santana, 2007); sin embargo, es necesario conocer cómo se relacionan otros índices, entre otros el de vegetación ajustada al suelo (SAVI) con la temperatura de superficie.

En una ciudad como Cali, los planificadores urbanos no han utilizado información térmica y de reflectividad contenida en las imágenes satelitales, como insumo para la planificación del desarrollo territorial, dado la escasa disponibilidad y, en otros casos, por desconocimiento de la técnica para el tratamiento y extracción de información. En un trabajo previo, (Santana *et al*, 2009) de detección de cambios en la ocupación del suelo de Cali, se demostró que la ciudad experimentó, entre 1984 y 2003, cambios significativos en la ubicación y extensión de zonas con vegetación verde y áreas construidas; ésta última clase aumentó en 3473 hectáreas para el período, crecimiento equivalente a un 1/3 del área construida que existía en 1984. En consecuencia, esta parte del trabajo tiene como objetivo valorar los efectos que los cambios de ocupación del suelo, ocurridos entre 1984 y 2003, han tenido en la temperatura de superficie. La contribución individual en el aumento de la temperatura de superficie, derivada de la disminución de áreas vegetadas (analizada por medio de los índices NDVI y SAVI) y del aumento de las áreas construidas (producto de la clasificación de imágenes Landsat de ambas fechas) debe ser analizada, con el fin de que los planificadores urbanos puedan dar prioridad a las acciones que se emprendan para mitigar los efectos adversos del aumento de la temperatura de superficie de la ciudad.

2. Metodología

2.1 Datos usados y procesamiento de las imágenes

Para la realización del presente trabajo se utilizaron parte de dos imágenes Landsat, identificadas con Path 09 y Row 52,

correspondientes a la ciudad de Cali y con una resolución espacial de 30 metros, obtenidas del Servidor *Land Cover Facility* de la Universidad de Maryland. Se trataba de una imagen TM, adquirida el 2 de septiembre de 1984, y una ETM+, tomada el 2 de enero de 2003, respectivamente; ambas se encontraban georeferenciadas, siguiendo el procedimiento descrito en Santana *et al*, (2009). Además se utilizó: (1) una capa vectorial (en formato shape) de los 343 barrios y áreas especiales existentes para el año 2003, obtenida de la Oficina de Planeación Municipal, la que superpuesta a la información temática obtenida de las imágenes permitió obtener las estadísticas para valorar los efectos del cambio de ocupación del suelo en la temperatura de superficie, y (2) estadísticas de área construida, por barrio y/o área especial, para los años 1984 y 2003, obtenidas del análisis de la clasificación supervisada de las imágenes de dichas fechas (Santana *et al*, 2009).

Los niveles digitales de las imágenes (ND) fueron convertidos a radiancia a nivel de satélite y luego a reflectividad siguiendo el procedimiento que aparece para estas imágenes en *Landsat Project Science Office* (2008). Para las bandas térmicas, la radiancia espectral a nivel de sensor fue transformada a temperatura de brillo del satélite, usando la ecuación (1) (Landsat Project Science Office, 2008):

$$T_L = K_2 / \ln((K_1 / L_\lambda) + 1) \quad (1)$$

donde T_L es la temperatura de brillo en grados Kelvin, para una radiancia L ; K_1 es la constante de calibración 1 en $W/(m^2 sr \mu m)$; K_2 es la constante de calibración 2 en grados Kelvin (adimensional); L_λ es la radiancia espectral del sensor.

Esta temperatura de brillo está referida como la de un cuerpo negro; por tanto fue necesario introducir la emisividad de la superficie de la tierra, considerando los tipos de uso, para obtener la temperatura cinética de superficie. Dicha conversión fue hecha mediante la ecuación (2) (Weng *et al*, 2004):

$$T_s = T_L / (1 + (\lambda / \rho) \ln \varepsilon) \quad (2)$$

donde T_s es la temperatura de superficie corregida con la emisividad; T_L es la temperatura de brillo del satélite; λ es la longitud de onda media de la banda termal considerada; $\rho = hc/\sigma$, ($1.438 \cdot 10^{-2}$ mK), h es la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Js), c es la velocidad de la luz, y σ es la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K); ε es la emisividad de la superficie.

La ecuación (3) permite calcular la emisividad de las coberturas (Li *et al*, 2004):

$$E = f_v \varepsilon_v + (1 - f_v) \varepsilon_s \quad (3)$$

Donde ε_v y ε_s son las emisividades de las cubiertas de vegetación y de suelo, respectivamente; se asumió que estas fueron de 0.985 y 0.978, respectivamente; f_v es la fracción de vegetación, obtenida con la ecuación (4) por medio del NDVI, uno de los índices de vegetación más usados (Choudhury *et al*, 1994).

$$f_v = 1 - ((NDVI_{MAX} - NDVI) / (NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}))^a \quad (4)$$

donde $NDVI_{MAX}$ es el valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor; $NDVI_{MIN}$ es el NDVI mínimo presente en suelo desnudo. A pesar de que en la imagen de NDVI existían valores negativos (especialmente en superficies de agua y nubes) se consideró un valor mínimo de 0. El exponente a depende de la orientación de las hojas de las plantas, y se tomó un valor de 0.6 (Li *et al*, 2004).

2.2 Obtención de indicadores temáticos de las imágenes Landsat

Además de la temperatura de superficie, calculada con el procedimiento descrito anteriormente, se utilizaron dos indicadores temáticos, producto de la transformación de la imagen TM y ETM+: índices de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) y de vegetación ajustado al suelo (SAVI).

La relación entre NDVI y T_s , como se dijo anteriormente, es ampliamente documentada en la literatura; por tanto, los cambios en el área construida y consecuentemente en la vegetación, analizada por el verdor que detecta dicho índice, pueden ser buenos indicadores para cuantificar la influencia de dichos cambios en la temperatura de superficie. Se utilizó además el índice SAVI para valorar su sensibilidad, respecto al NDVI, con la temperatura de superficie.

NDVI ha sido reconocido como uno de los indicadores más útiles para el estudio de características de la biosfera terrestre y su dinámica, a nivel global, regional y local (Chuvieco, 2002). Se obtiene de la ecuación (5):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (5)$$

Donde NIR y R denotan la reflectividad del infrarrojo cercano (NIR) y rojo (R), respectivamente, de la imagen Landsat.

Finalmente se utilizó el índice SAVI, propuesto por Huete (1988), el cual es apropiado para regiones que tienen baja cubierta vegetal y consecuentemente alto porcentaje de reflectancia del suelo. Se obtuvo aplicando la ecuación (6):

$$SAVI = [(NIR - R) / (NIR + R + L)] (1 + L) \quad (6)$$

Siendo L un coeficiente de ajuste de la vegetación, equivalente a 0.5, recomendado para densidades intermedias (Chuvieco, 2002).

Considerando que en las ciudades el barrio es una de las unidades espaciales básica para la obtención de datos, útiles en la gestión y planificación, se obtuvo un valor promedio por barrio de cada uno de los indicadores temáticos, mediante la superposición del mapa de barrios a los datos ráster de T_s , NDVI y SAVI. Estos datos, junto a los de área construida, se usaron en los análisis estadísticos posteriores. El procesamiento de las imágenes, se realizó con el programa PCI Geomatica.

2.3 Influencia de los cambios de ocupación del suelo en la temperatura de superficie

Para valorar la influencia que los cambios de ocupación del suelo acontecidos en Cali, entre 1984 y 2003, han tenido en la temperatura de superficie, se utilizó un modelo de diferencias de las variables T_s , NDVI, SAVI y Área construida, obtenidas de las imágenes de satélite. Se obtuvieron modelos de regresión lineal, basado en el que aparece en la ecuación (7), de los que se seleccionó el que mostrara mejor capacidad para explicar la variable dependiente, en este caso la diferencia de temperatura de superficie entre 1984 y 2003 (ΔT_{s03-84}).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (7)$$

donde Y es la variable dependiente; β_0 es la constante o intersección; X_1 , X_2 , y X_n son las variables independientes; β_1 , β_2 y β_n son los parámetros de pendiente asociado a cada variable independiente; ε es el error o desviación aleatoria de Y.

Los pasos seguidos para evaluar los efectos de los cambios de ocupación del suelo sobre T_s , fueron los siguientes:

- Obtención de valores promedios por barrio y/o área especial de la temperatura de superficie, NDVI y SAVI, superponiendo el Shape de barrios a las imágenes temáticas respectivas. Ya se contaba, mediante un trabajo realizado previamente, con el área construida de la ciudad para los años 1984 y 2003, obtenida de la clasificación supervisada de las imágenes correspondientes (Santana *et al*, 2008). Dado que la fecha de toma de las imágenes, estacionalidad climática, afecta el comportamiento del verdor de la vegetación, se procedió a normalizar las series de NDVI y SAVI de 1984 y 2003 a fin de que estuvieran en una escala comparable. Para ello se utilizaron las ecuaciones (8) y (9), respectivamente. T_s y área construida de ambas fechas se encontraban en la misma unidad de medida, grados centígrados y hectáreas, respetivamente.

$$NDVI_{\text{escalado}} = (NDVI - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}) \quad (8)$$

$$SAVI_{\text{escalado}} = (SAVI - SAVI_{\min}) / (SAVI_{\max} - SAVI_{\min}) \quad (9)$$

- Obtención de las diferencias, entre 1984 y 2003, de las estadísticas de barrios de T_s , NDVI, SAVI y Área construida. Comprobada su distribución normal, se procedió a obtener la regresión lineal de la diferencia de T_s 1984-2003 (ΔT_{s03-84}) como variable dependiente, usando la diferencia de área construida 1984-2003 ($\Delta A_{\text{const}03-84}$) junto a la diferencia de NDVI 1984-2003 ($\Delta NDVI_{03-84}$) por un lado, y junto a la diferencia de SAVI 1984-2003 ($\Delta SAVI_{03-84}$) por el otro, como variables independientes. Se seleccionaron esos pares de variables por ser las que muestran menor correlación entre ellas y por tanto menor colinealidad.

- Obtenidas las dos ecuaciones de regresión, se procedió a examinar los estadísticos de control, seleccionando aquella que mostró mayor capacidad para predecir la diferencia de temperatura entre las dos fechas (ΔT_{s03-84}).

- Finalmente se calculó la diferencia de T_s 2003-1984 estimada ($\Delta T_{sE_{03-84}}$) y luego la contribución porcentual de cada variable independiente y otras no consideradas en la ecuación (recogidas en el intercepto) para predecir a $\Delta T_{sE_{03-84}}$. El análisis de estas contribuciones en la explicación de la diferencia de temperatura, permitió valorar los efectos de los cambios en la ocupación del suelo (área construida y factor de vegetación) en los cambios en la temperatura de superficie entre los años 1984 y 2003, para los distintos barrios y comunas de la ciudad. En la Figura 1 se incluye un mapa, con la división en comunas, de la ciudad de Cali.

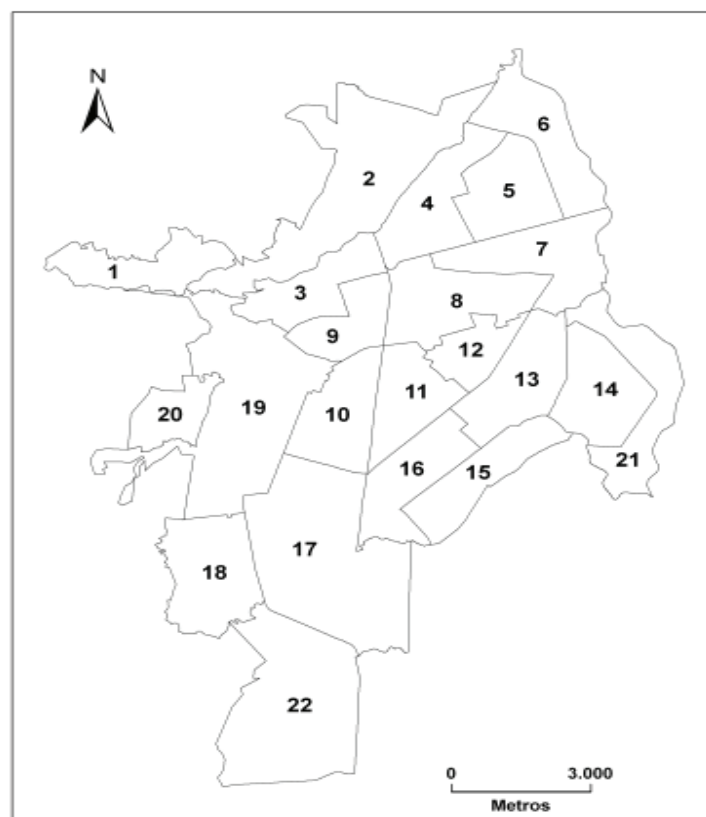


Figura 1. Mapa de la división administrativa, en comunas, de la ciudad de Cali

3. Resultados y discusión

3.1 Comportamiento de la temperatura de superficie, en los años 1984 y 2003.

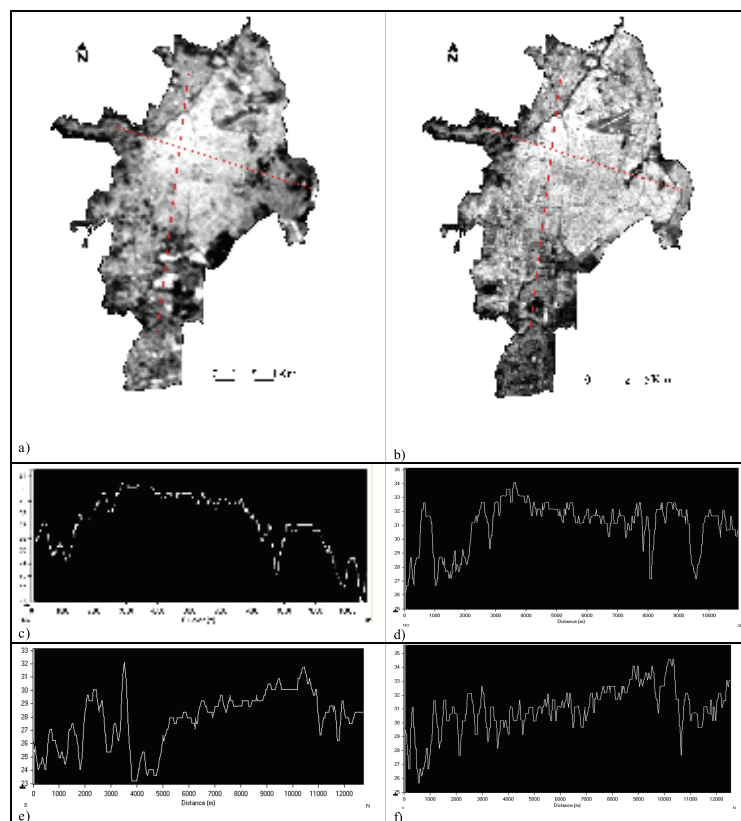
Las imágenes de temperatura de superficie extraídas de la banda termal de las imágenes TM y ETM+ y su comportamiento espacial, a lo largo de dos perfiles transversales, se muestran en la Figura 2. Se aprecia que para el año 1984 (Figura 2a), la expresión de isla de calor (representada por una tonalidad clara a blanca) aparece en el Centro de la ciudad y en los barrios más cercanos, pertenecientes principalmente a las comunas 3, 8, 9, 10, 11 y 12; hacia la periferia y en todas las direcciones, se encuentran zonas con mayor proporción de vegetación y menor de Área Construida las que tienen una menor temperatura de superficie, evidenciada por sus tonalidades oscuras a negras. Para el año 2003, en cambio,

(Figura 2b) el crecimiento de las áreas construidas de la ciudad ha ocasionado una expansión de la isla de calor (tonalidad clara a blanca), cubriendo la casi totalidad del perímetro urbano de la fecha, excepto sectores del sur (comunas 17 y 22), hacia los cerros del occidente (comunas 1, 20 y 18) y unos enclaves muy localizados al oriente. Se debe destacar también que al comparar las imágenes de temperatura de ambas fechas, la de 2003 tiene muestra una mayor nitidez, dado que su resolución espacial era de 60 metros, mientras la de 1984 era de 90 metros.

En las Figuras 2c y 2d, se muestran respectivamente, el comportamiento de la T_s para 1984 y 2003 en el perfil con sentido NO-SE. Es notorio que: (1) para 1984, las T_s predominantes, a lo largo del perfil, estaban por debajo de 30 grados centígrados; (2) para el 2003, las T_s predominantes correspondían a valores por encima de 30 grados;

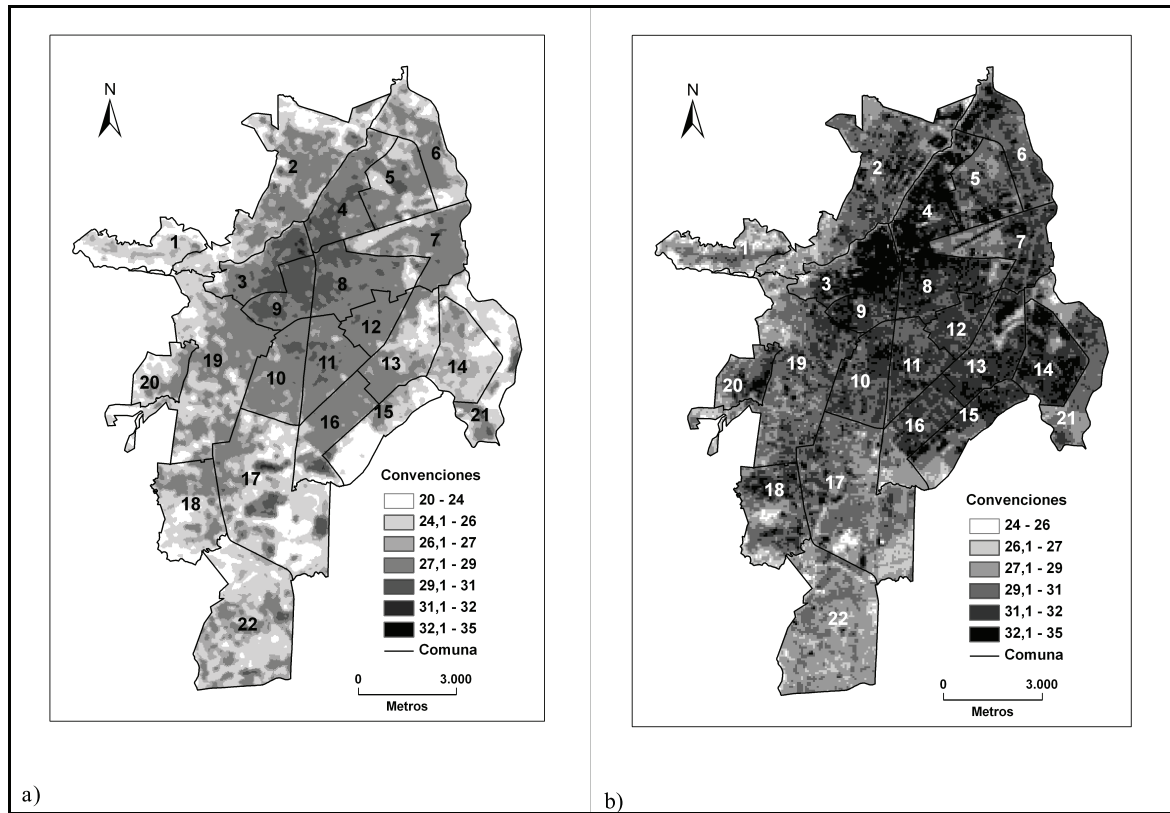
y (3) para 1984 las zonas de menor temperatura se ubicaban hacia los extremos del perfil, denotando la presencia de la isla de calor en zonas cercanas al Centro de la ciudad, aunque para el 2003 la isla de calor se extiende al oriente de la ciudad. Los perfiles en sentido S-N de 1984 y 2003 (Figuras 2e y f respectivamente), muestran un aumento de temperatura similar al señalado, lo que demuestra el aumento general de la temperatura de la ciudad en las dos décadas del análisis; también muestran que existe un aumento progresivo de la temperatura de sur (izquierda de las figuras) a norte; crecimiento que desciende y vuelve a subir escalonadamente al cruzar el río Cali, aproximadamente a los 1150 metros, denotando mejores condiciones de vegetación en el norte y sur de la ciudad.

La categorización de los valores de temperatura de superficie de los píxeles de las imágenes de temperatura de superficie para 1984 y 2003, se muestra en la Figura 3. A partir de la valoración de las clases representadas, es notorio que para 1984 (figura 3a) las zonas de mayor temperatura se ubicaban, tal como se señaló, en el Centro de la ciudad, con temperaturas predominantes entre los 31 y 32 grados; también es claro que considerable extensión de la periferia mostraba temperaturas por debajo de 26 grados centígrados. Para el 2003 (figura 3b) se evidencia: (1) un aumento general de la temperatura de la ciudad, (2) un aumento del número de barrios con temperatura en los rangos 31-32 y 32-35 grados, demostrando el crecimiento de la isla de calor; y (3) que las zonas con los rangos más bajos de temperatura (24 a 27 grados) estaban confinadas a pequeñas zonas al occidente (comuna 1) y al sur (comunidades 17 y 22).



Los tonos claros a blancos en las imágenes se corresponden con las más altas temperatura de superficie, y los oscuros con las más bajas.

Figura 2. Imágenes de temperatura de superficie para 1984 (a) y 2003 (b), con la ubicación de dos perfiles transversales; en (c) y (d) aparecen, respectivamente, la T_s para 1984 y 2003 en sentido NO-SE; y en (e) y (f) la T_s para 1984 y 2003 en sentido S(izq)N(der).



Las clases se establecieron por el método Manual; los polígonos y números identifican las comunas de la ciudad.

Figura 3. Mapas con clases de temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$), para los años 1984 (a) y 2003 (b).

Ahora bien, la diferencia entre las temperaturas de 2003 y 1984, para el momento de toma de las imágenes, se muestra en la Figura 4. Se corrobora que la mayor parte de la ciudad experimentó un aumento de temperatura superior a 3 grados centígrados, aunque las zonas del Centro y alrededores tuvieron un aumento mayoritario entre 1 y 3 grados.

Los más altos incrementos de T_s (7 a 9 grados) ocurrieron fundamentalmente en barrios del oriente, El Morichal, El Vallado, Manuela Beltrán, Ciudadela del Río (comunas 15, 14 y 21); del norte, Floralia, Brisas de los Álamos y Jorge Eliécer Gaitán (comunas 6 y 2). En cambio, los menores aumentos de temperatura (0 a 0,6 grados) se localizan en sectores del sur de la ciudad, especialmente en las Parcelaciones de Pance

(comuna 22), Universidad del Valle, El Ingenio y El Limonar (comuna 17); hacia el oriente, en Potrero Grande y Desepaz (comuna 21) y al norte en pequeñas áreas próximo al río Cali (comunas 3, 4 y 6).

Considerando los promedios de la diferencia de temperatura de superficie entre 2003 y 1984, a nivel de comuna, los mayores aumentos ocurrieron en las comunas 15, 14, 13 y 6, con valores promedios entre 4.3 y 6.1 grados centígrados (Figura 5); los menores incrementos, en cambio, acontecieron en las comunas 9, 11, 3, 8 y 12, con valores promedios entre 2.7 y 3.5 grados centígrados, que son las zonas que tuvieron menor modificación de la ocupación del suelo, especialmente de la relación Aérea construida - vegetación.

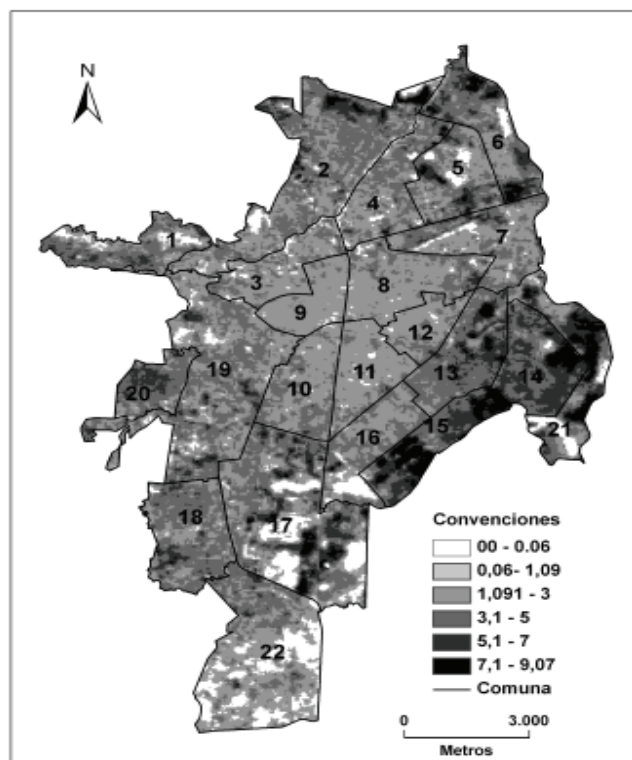


Figura 4. Mapa de la diferencia de temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$), entre los años 2003 y 1984, para la ciudad de Cali.

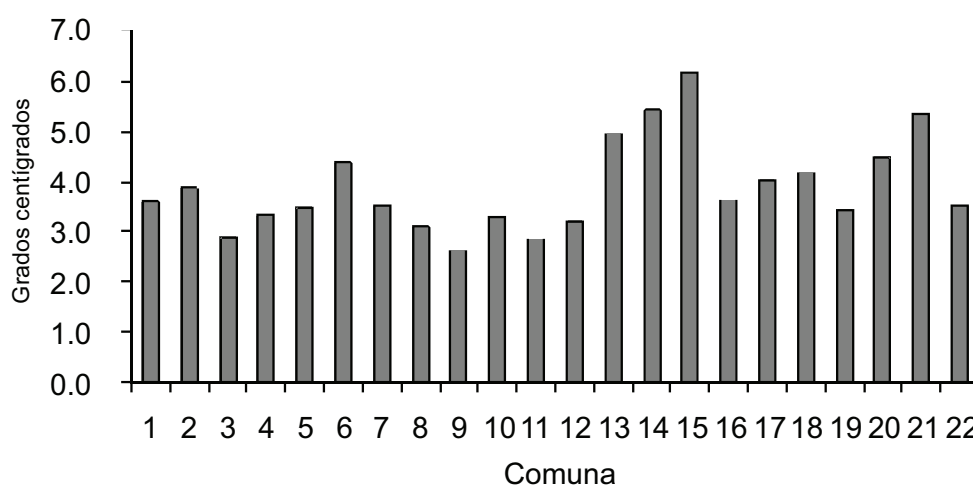


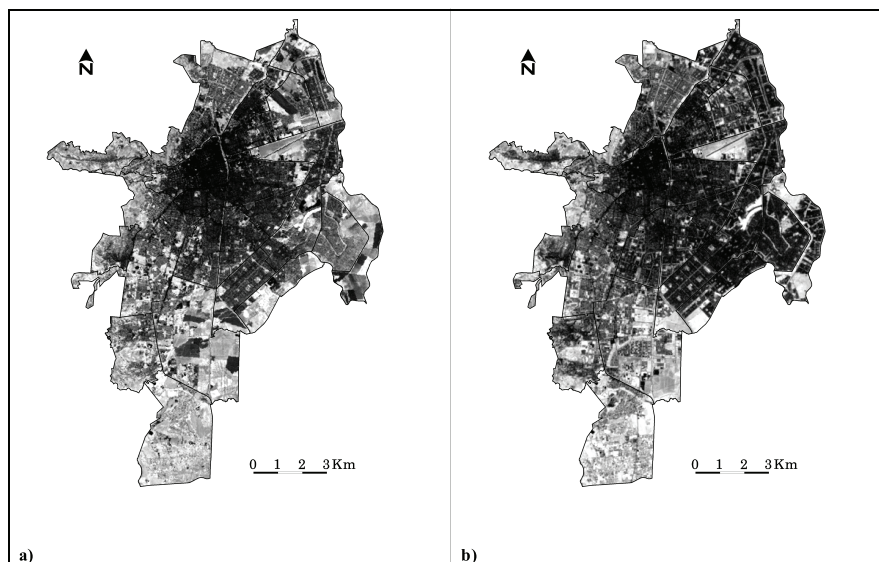
Figura 5. Diagrama de la diferencia de temperatura de superficie ($^{\circ}\text{C}$), por comuna, entre los años 2003 y 1984.

3.2 Comportamiento del Índice SAVI, en los años 1984 y 2003

Las imágenes del Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) escalado, para los años 1984 y 2003 se muestran en la Figura 6 a y b, respectivamente. Se aprecia que para 1984 los menores valores del índice, tonos oscuros, se localizan en barrios del Centro de la ciudad; estando los mayores, tonos claros, hacia el sur de la ciudad. Para el 2003, las zonas centro y sur de la ciudad mantienen características iguales a las mencionadas (bajo y alto valores, respectivamente), pero varios barrios de las comunas 14, 21, 7 y 6 del oriente de la ciudad, sufrieron una disminución de los valores del índice, lo que se evidencia por la aparición de tonos oscuros en zonas que en 1984 tenían tonalidad clara o gris clara. En la imagen de SAVI del 2003, la aparición de valores altos (tonos claros) es más notoria en barrios que para la fecha se encontraban con vegetación herbácea y/o arbustiva: Potrero Grande y Planta de Tratamiento (comuna 21), Laguna El Pondaje (comuna 14), Base Aérea (comuna 7), Lili, Ciudad 2000, El Limonar, La Hacienda (comuna 17), Parcelaciones de Pance (comuna 22) y sectores de la Comuna 1, 20 y 18 al occidente de la ciudad.

El promedio de SAVI escalado para todos los barrios de la ciudad en el año 1984 fue 0.419, con una desviación típica de 0.229; para el 2003 fue de 0.283, con una desviación 0.199. Estos datos evidencian que en general hubo una disminución del componente verdor, representado por SAVI, durante las dos décadas analizadas. También hubo una disminución de la desviación típica, demostrando que para el 2003 se tendió a una mayor homogeneización del comportamiento del Índice.

A nivel de comuna, los valores promedios de la disminución del índice SAVI entre 2003 y 1984, se presentan en la Figura 7. Se observa que las mayores pérdidas ocurrieron en las comunas 15, 14, 6 y 13, con una disminución del índice entre 0.29 y 0.48 unidades. Precisamente estas cuatro comunas, además de la 21, fueron las que presentaron mayor diferencia en la temperatura de superficie (Figura 5), con valores por encima de seis grados. En sentido contrario, las comunas 9, 3, 1, 4, 8 y 11 fueron las que tuvieron la menor disminución de SAVI, con valores menores a 0.1; mientras los menores aumentos de temperatura de superficie para el período analizado se registraron en las comunas 9, 11, 3 y 8, con menos de tres grados.



Los tonos oscuros se corresponden con los menores valores del índice y los claros con los mayores.

Figura 6. Imágenes con el comportamiento espacial de SAVI en la ciudad, para los años 1984 (a) y 2003 (b).

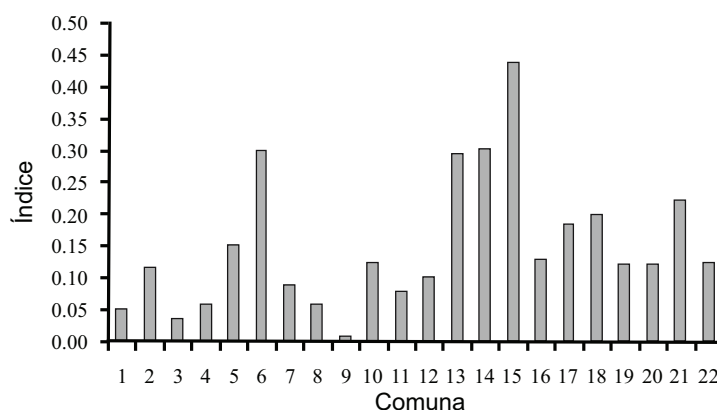


Figura 7. Diagrama de la disminución de SAVI, por comuna, entre los años 2003 y 1984

Es clara entonces la relación inversa entre el componente vegetación y la temperatura de superficie, dado los efectos de las plantas en la transferencia del calor latente almacenado en la atmósfera por medio de la transpiración; relación que ha sido encontrada por varios autores usando el índice de diferencia normalizada de vegetación - NDVI- y no mediante el SAVI.

3.3. Caracterización del Área construida, para los años 1984 y 2003

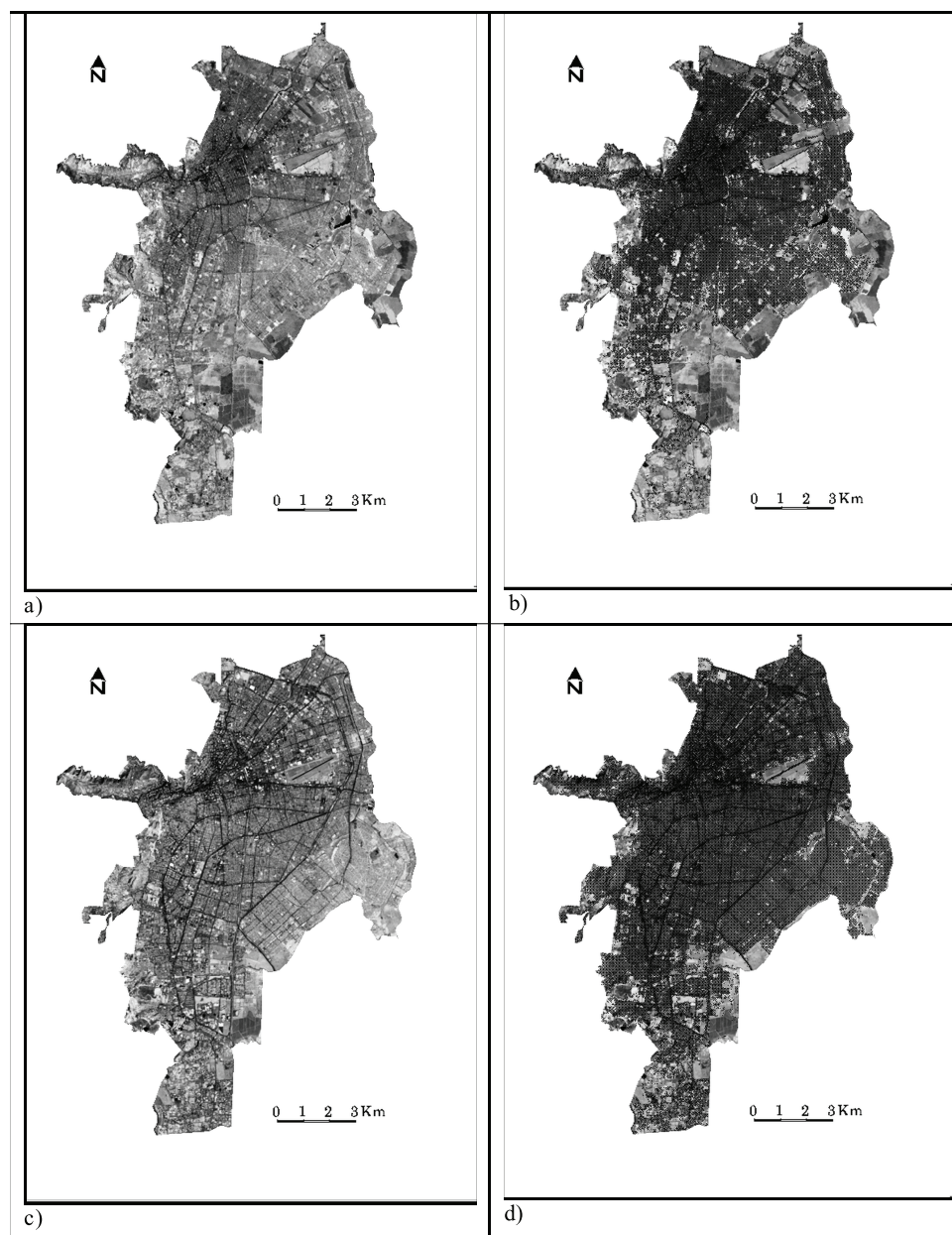
Como quedó establecido en el numeral 2.1, sobre los datos usados, el análisis de los efectos de los cambios en el Área Construida sobre la temperatura de superficie se realiza con las estadísticas obtenidas mediante la clasificación supervisada de las imágenes TM de 1984 y ETM de 2003. Los mapas binarios obtenidos, donde se muestran las clases de ocupación Área Construida y Área no Construida, junto a la apariencia que la ciudad proyectaba desde el satélite para cada fecha, se encuentran en la Figura 8.

Se aprecia que para el año 1984 la mayor proporción de área construida se concentraba en la zona centro de la ciudad, en las comunas 2, 3, 9, 8, 11, 12 y en parte de las comunas 5, 7, 19, 10, 13, 14 y 16 (Figuras 8a y 8b). Es claro que no existían los barrios del Distrito de Aguablanca pertenecientes

a la comuna 21, como tampoco los ubicados al suroriente de la intersección de la Avenida Pasoancho con carrera 50 (barrios Primero de Mayo, El Limonar, La Hacienda, El Ingenio, Caney, etc.), dentro de la Comuna 17; ni las Parcelaciones de Pance, en la hoy Comuna 22. Al norte de la Base Aérea, existían zonas despobladas con una extensión considerable, como los barrios hoy llamados Villa del Prado, La Riviera, Los Andes, Jorge Eliécer Gaitán, Torre de Confandi, La Flora, entre otros; como tampoco sectores de Menga.

Al observar la apariencia de la ciudad para el 2003, captada en la imagen ETM, (Figura 8c), se nota que han ocurrido cambios importantes en el área construida respecto a la situación del año 1984, especialmente la densificación de las comunas periféricas de la ciudad: las 1, 3, 18 y 20 al occidente; 5 al norte; 6 al oriente y 17 y la hoy comuna 22 al sur; pero sin duda los cambios más importantes del período analizado, es la aparición completa de la comuna 21, al oriente de la ciudad, y de varios barrios al suroriente de la comuna 17 (Figura 9). En la Figura 8d se representa el área construida obtenida de la clasificación de la imagen de 2003.

Las estadísticas del área ocupada por construcciones, en cada una de las fechas consideradas, se muestran en la Tabla 1. Para el



* La ciudad se reconoce en a y c por el patrón de calles y manzanas.

Figura 8. Apariencia de la ciudad de Cali para el año 1984 (a) y 2003 (c), vistas sobre composición 4-5-3 de las imágenes Landsat. En (b) y (d), respectivamente, se muestran, mediante trama de puntos oscuros, las áreas construidas obtenidas de las clasificaciones supervisadas de dichas imágenes, sobre una composición 5-4-3*

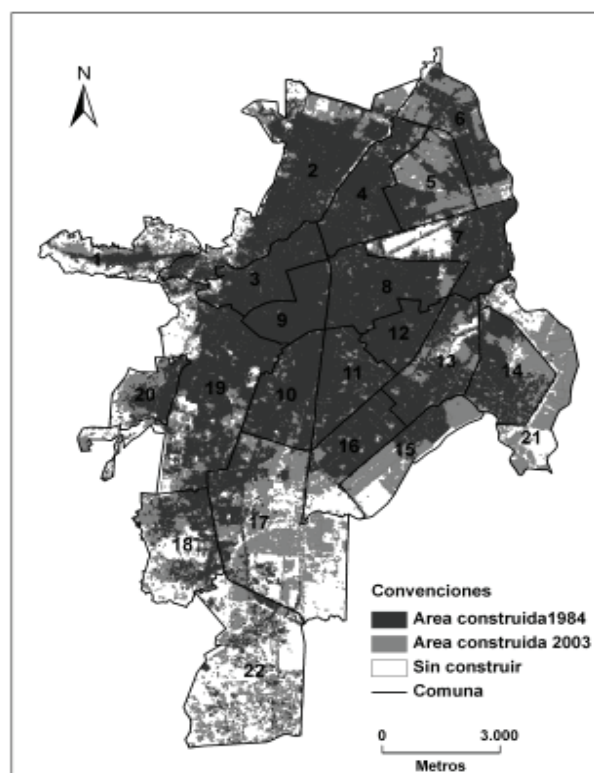


Figura 9. Mapa de cambio de Área construida, para Cali, entre los años 1984 y 2003.

Tabla 1. Matriz de transición de las clases área construida y no construida entre los años 1984 y 2003.

Ocupación del del suelo, 1984	Ocupación del suelo, 2003			Pérdida
	Área construida	Área no construida	Total 1984	
Área construida	5960.25	0.0	5960.25	0.0
Área no construida	3473.55	2665.98	6139.53	3473.55
Total 2003	9433.8	2665.98		
Ganancia	3473.55	0.0		

1984 las zonas construidas ocupaban el 49% de la extensión total de la ciudad, considerando el perímetro de 2003; mientras que para el 2003 el 78% del área se encontraba construido, lo que representa un aumento del 29% en las dos décadas del estudio.

La Figura 10 muestra el aumento del Área Construida ocurrida, por comuna, entre los años 1984 y 2003. Las comunas que experimentaron un mayor aumento del área construida fueron, en orden decreciente, las 17 y 22, ubicadas al sur de la ciudad, con valores entre 340 y 450 hectáreas; le

siguen la 19, 2 y 21, ubicadas al occidente, norte y oriente, respectivamente; y las 5, 6 y 15, ubicadas al oriente y suroriente, con un aumento alrededor a 200 hectáreas. Las que sufrieron menor aumento del área construida fueron, en su orden, la 9, 12, 3, 16, 4, 11 y 10, con valores entre 10 y 50 hectáreas; a las que pertenecen los barrios del Centro de la ciudad y barrios próximos en dirección oriente, suroriente.

Frente a la pregunta sobre los efectos que ha tenido el aumento del área construida y la disminución de la vegetación, ocurridos entre 1984 y 2003, en el

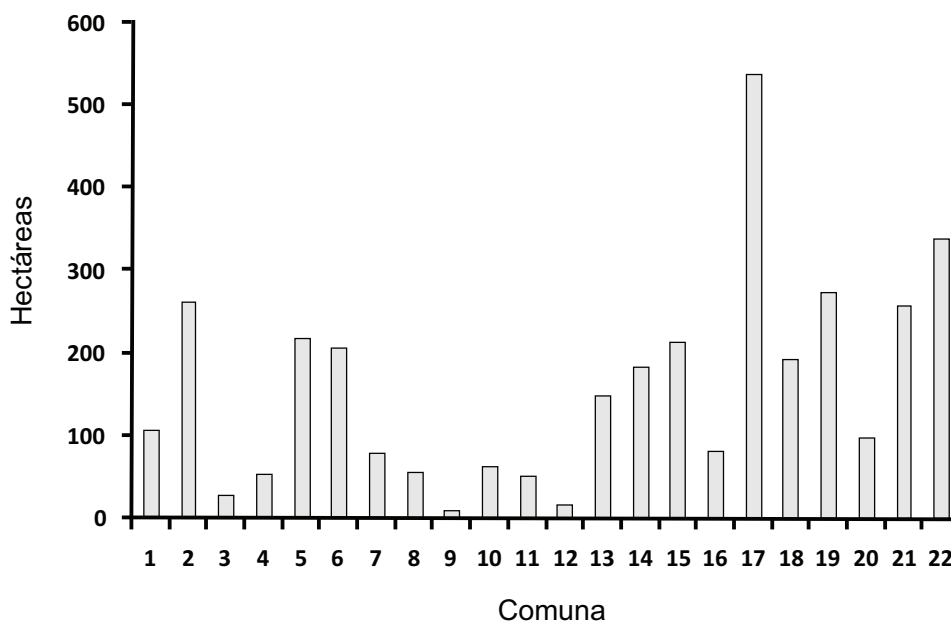


Figura 10. Diagrama del incremento de Área construida, por comuna, entre los años 2003 y 1984.

incremento de la temperatura de superficie, en la Tabla 2 se presentan los dos modelos de regresión obtenidos: (1) usando NDVI y Área Construida, y (2) SAVI y Área Construida, como variables independientes. Los coeficientes, en ambos casos, tienen un comportamiento consistente; la variable Área Construida muestra una correlación positiva con la diferencia de T_s observada, mientras la diferencia de NDVI y de SAVI normalizadas tiene una correlación negativa respecto a T_s . Estos resultados concuerdan con los trabajos previos, en el sentido de que la presencia de vegetación, captada por medio de NDVI y SAVI, aminora la temperatura de superficie; en sentido similar, las áreas construidas contribuyen con el aumento de T_s .

En el primer modelo, usando la diferencia de NDVI, aún cuando el R^2 y R^2 ajustado es de 72%, la variable diferencia de Área Construida resultó ser no significativa, con una probabilidad de 0,199; en el segundo, usando la diferencia de SAVI, ambas variables independientes son significativas al 99,9% y el R^2 alcanza un 65%. En consecuencia, se seleccionó el segundo modelo para obtener la diferencia de temperatura de superficie estimada, a nivel de barrio.

3.4 Efectos de los cambios de ocupación del suelo en la temperatura de superficie.

La aplicación del modelo seleccionado, permitió obtener la diferencia de temperatura de superficie esperada para todos los barrios y áreas especiales de la ciudad. Los resultados del modelo con los valores promedios de las variables para toda la ciudad, aparecen en la Tabla 3. Se demuestra que la mayor responsabilidad para explicar el aumento de 3.76 grados que experimentó la ciudad de Cali, en los 20 años del análisis, le corresponde a otras variables no consideradas en el modelo (emisiones de partículas por quema de combustibles fósiles en fuentes móviles y fijas, ozono troposférico, condiciones atmosféricas, uso de energía, propagación del calor producido por vecindad, entre otras), con un 77%; le sigue la disminución del índice SAVI, con un 21% y el aumento de área construida tan sólo contribuyó a explicar un 1% del aumento de la temperatura de superficie.

Ahora bien, considerando los promedios a nivel de comuna, tanto de la diferencia de T_s observada como de la esperada, los resultados que se muestran en la Tabla 4 dan cuenta que de las 22

Tabla 2. Modelos de regresión de la diferencia de T_s entre 2003 y 1984 ($\Delta T_{s\ 03-84}$), usando la diferencia de NDVI y SAVI normalizadas, junto a Área construida.

Variables	Coefficiente	Coefficiente error	Probabilidad	VIF
Constante	3.38201	0.03770	0.000	
$\Delta NDVI_{03-84}$	-5.9234	0.2091	0.000	1.057
Δ Área construida ₀₃₋₈₄	0.002454	0.001905	0.199	1.057
S = 0.585830	R -cuad. = 71.9%	R -cuad.(ajustado) = 71.7%		
PRESS = 127.299	R -cuad.(pred) = 69.27%	Durbin -Watson = 1.32957		

Variables	Coefficiente	Coefficiente error	Probabilidad	VIF
Constante	2.91000	0.05036	0.000	
$\Delta SAVI_{03-84}$	-5.8950	0.2452	0.000	1.044
Δ Área construida ₀₃₋₈₄	0.004607	0.002111	0.030	1.044
S = 0.653616	R -cuad. = 65.0%	R -cuad.(ajustado) = 64.8%		
PRESS = 160.933	R -cuad.(pred) = 61.15%	Durbin -Watson = 1.33758		

Tabla 3. Diferencia de temperatura de superficie (T_s) promedio observada y esperada para toda la ciudad, y efecto porcentual (promedio) de otras variables, SAVI y área construida para explicar el aumento de la temperatura de superficie.

T_s (Prom.) *		Otras variables	Disminución de SAVI	Aumento Área construida
$\Delta T_{s\ o}$	$\Delta T_{s\ e}$	Prom.	Prom.	Prom.
3.762	3.761	77.39	21.42	1.24

* Prom., corresponde al promedio; $\Delta T_{s\ o}$, es la diferencia de T_s observada; y $\Delta T_{s\ e}$, es la diferencia de T_s esperada.

comunas de la ciudad, el 50% presentó una diferencia de T_s estimada mayor que el promedio de la diferencia de T_s observada. Todos los valores promedios por comuna de T_s esperada, superan a la constante del modelo seleccionado (2,91), aunque sin mayores diferencias. Por tanto, la incidencia de otras variables, no consideradas en nuestros modelos, para explicar la diferencia de temperatura de superficie es en general alta, excepto en las comunas 15, 14, 6, 13 y 22 que tienen una contribución mediana, entre 53 y 71%.

La contribución originada por la disminución de SAVI es en general baja, con mayor contribución porcentual en las comunas 15, 14, 6, 13 y 18, donde el aumento de la temperatura de superficie se explica tan sólo entre un 45 a 27%. Considerando el aumento del Área construida, los

efectos en el aumento de T_s son muy bajos, siendo la mayor contribución para explicar la diferencia de T_s la presentada en la comuna 1, con 4,8%.

En la Figura 11, se visualiza claramente los efectos del aumento de Área construida y disminución del componente de verdor (SAVI) respecto a otras variables, que no hacen parte del modelo, para explicar el aumento de la temperatura de superficie a nivel de comuna; se aprecia que la contribución que ha tenido el aumento del Área construida, ocurrida entre los años 1984 y 2003, es muy baja en todas las comunas. Los mayores efectos ocurrieron en las comunas 22 y 1, con una contribución porcentual de tan sólo 8 y 5%, respectivamente. La disminución del índice de vegetación SAVI, explica el aumento de la temperatura mayormente entre 15 y 25%, salvo en las comunas 6, 13, 14 y 15 que varía entre 35 y

Tabla 4. Diferencia de temperatura promedio observada y esperada por comuna, y efecto porcentual (promedio y desviación típica) de otras variables, disminución de SAVI y aumento de área construida para explicar el incremento de la temperatura de superficie.

Comuna	T _s (Prom.)*		Otras variables		Disminución de SAVI		Aumento Área constr uida	
	$\Delta T_{s o}$	$\Delta T_{s e}$	Prom.	Desv. típica	Prom.	Desv. típica	Prom.	Desv. típica
1	3.587	3.369	86.4	1.9	8.7	1.6	4.8	0.5
2	3.786	3.566	81.9	11.5	16.9	11.1	1.3	1.0
3	2.907	3.093	94.5	6.2	5.3	6.1	0.3	0.2
4	3.261	3.223	90.3	10.5	9.4	10.3	0.3	0.4
5	3.482	3.872	78.3	16.8	19.5	16.9	2.2	1.3
6	4.386	4.738	63.8	13.0	34.8	12.9	1.4	1.2
7	3.529	3.450	85.5	10.4	13.6	11.4	0.9	1.5
8	3.095	3.251	90.7	9.9	8.9	9.5	0.4	0.6
9	2.635	2.959	98.5	4.4	1.3	4.4	0.1	0.2
10	3.283	3.633	81.2	9.3	18.3	9.0	0.4	0.4
11	2.862	3.373	86.8	6.5	12.9	6.4	0.3	0.2
12	3.203	3.519	84.1	9.7	15.8	9.6	0.2	0.2
13	4.950	4.638	66.0	16.0	33.3	16.5	0.7	1.0
14	5.427	4.775	61.2	4.3	37.1	3.4	1.7	1.3
15	6.054	5.202	53.2	9.3	44.6	7.8	2.2	2.0
16	3.389	3.479	82.4	22.4	16.6	22.3	0.9	0.9
17	3.935	4.052	73.5	16.3	23.9	17.5	2.6	1.7
18	4.176	4.120	72.0	10.1	26.9	10.2	1.1	1.0
19	3.450	3.647	81.1	10.5	17.9	10.3	0.9	0.7
20	4.488	3.653	81.9	14.8	17.0	14.4	1.1	0.9
21	4.853	3.714	73.0	21.0	24.7	21.5	2.3	1.1
22	3.516	4.250	70.7	13.8	21.7	17.9	7.6	11.0

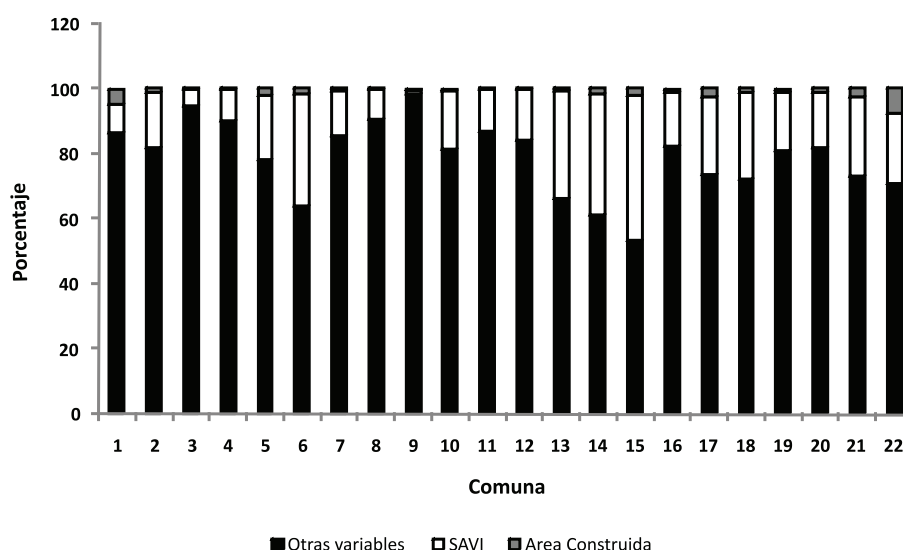


Figura 11. Diagrama sobre la incidencia de la disminución de SAVI, aumento de Área construida y de otras variables, en el aumento de la temperatura de superficie de Cali, entre 1984 y 2003, por comuna.

45%. Es claro que el aumento de la temperatura de superficie, a nivel de comuna, se debe mayoritariamente a otras variables no consideradas en el modelo (emisiones de partículas por quema de combustibles fósiles en fuentes móviles y fijas, ozono troposférico, condiciones atmosféricas, uso de energía eléctrica, propagación por vecindad del calor producido, calentamiento global, entre otras), con una contribución que varía del 53% en la comuna 15 a 99% en la comuna 9.

4. Conclusiones

De los resultados de este trabajo es importante resaltar que la ciudad de Cali, en las dos décadas del análisis (años 1984 a 2003), experimentó un drástico cambio en la ocupación del suelo, con una ganancia significativa de área construida (3473 hectáreas, equivalente al 29% del perímetro urbano del 2003) en detrimento de pastos, rastrojos, cultivos y áreas arboladas. Estas transformaciones de las características de la superficie han conllevado cambios en los procesos de transferencia de energía entre la tierra y atmósfera, entre otros, con la consecuente aparición y expansión de la isla de calor urbano.

De la comparación de los resultados de los modelos de regresión, se concluyó que el índice SAVI, junto con Área Construida, tiene mayor sensibilidad que el NDVI para explicar el aumento de la temperatura de superficie, por cuanto el primero capta no sólo la actividad de los tejidos del follaje, sino la reflectividad del suelo. Autores como Weng *et al* (2004) recomendaban que era necesario realizar nuevos estudios sobre la interrelación entre NDVI y T_s en áreas con menos vegetación y con amplios rasgos antrópicos como las ciudades, dado que era más eficiente en zonas más densamente vegetadas. En todo caso, nuestros hallazgos concuerdan con trabajos previos sobre el importante papel de la vegetación en la disminución de la temperatura de superficie; y avanzan en el sentido de precisar cuál es la contribución individual del aumento del área construida y de la disminución del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) para explicar el incremento de la temperatura de superficie, tanto para toda la ciudad, como para las distintas

unidades administrativas (comunas) en que está dividida Cali.

Se encontró que la temperatura de superficie de Cali aumentó, entre 1984 y 2003, un promedio de 3.76 grados centígrados, incremento que se propagó a muchos barrios de las partes central, oriental y norte de la ciudad y que determinan el crecimiento de la isla de calor. Este aumento en T_s se explica tan sólo en un 1% por el aumento del área construida, mientras el 21% de dicho aumento se explica por la disminución del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI); en cambio la contribución más importante para explicar el calentamiento, 77%, le corresponde a otras variables no consideradas en nuestro estudio, como pueden ser emisiones de partículas por quema de combustibles fósiles en fuentes móviles y fijas, presencia de ozono troposférico, las condiciones atmosféricas locales y regionales, uso de energía eléctrica, propagación del calor almacenado en la superficie, efectos del calentamiento global, entre otras.

A nivel de comuna, la contribución de cada una de las variables es desigual, dado el comportamiento particular que presenta cada una, pero existe consistencia en que en todos los casos la mayor contribución le corresponde a otras variables, seguido muy de lejos por la disminución de SAVI y finalmente por el aumento del área construida cuyos máximos efectos se produjeron en las comunas 22 y 1 con tan sólo un 8 y 5%, respectivamente.

En consecuencia, una tarea importante que deben emprender los planificadores e instituciones de planificación urbanas, con la finalidad de contrarrestar o disminuir los efectos adversos de la isla de calor en la ciudad, es mantener y aumentar las áreas verdes en los barrios más críticos; pues este trabajo demuestra que la disminución del componente verdor (SAVI) tiene mayor contribución en el aumento de la temperatura que el aumento del área construida.

5. Referencias bibliográficas

Chen, X.L.; Zhao, H.M.; Li, P.X. & Yin, Z.Y. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104, 133-146.

Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129-138.

Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J. & Daughtry, C.S.T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by made simulation. *Remote Sensing of Environment*, 50, 117.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel. Barcelona, España.

Hu, Z. & Lo, C.P. (2007). Modelling urban growth in Atlanta using logistic regression. *Computers, Environmental and Urban Systems*, 31, 667-688.

Hu, Z.L.; Du, P.J. & Guo, D.Z. (2007). Analysis of urban expansion and driving forces in Xuzhou City based on Remote Sensing. *Journal of China University of Mining & Technology*, 17 (2), 267-271.

Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (Savi). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.

Landsat Project Science Office. (2008). *Landsat 7 Science Data User's Handbook, chapter 11* (Data products). Disponible en línea en: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html (visitada por última vez el 13 de junio de 2009).

Li, F., Jackson, T.J., Kustas, J.W., Schmugge, T.J., French, A.N. & Cosh, M.C. (2004). Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX. *Remote Sensing of Environment*, 92, 521-534.

Lo, C.P. & Quattrochi, D.A. (2003). Land-Use and Land-Cover Change, Urban Heat Island Phenomenon, and Health Implications: A Remote Sensing Approach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69 (9), 1053-1063.

Martinuzzi, S.; Gould, W.A. & Ramos-Gonzalez, O.M. (2007). Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico integrating remote sensing and population census data. *Landscape and Urban Planning*, 79, 288-297.

Mesev, V. 1998. Remote Sensing of urban systems: hierarchical integration with GIS. *Comput. Environ. Urban System*, 21 (3/4), 175-187.

Miller, R.B. & Small, C. (2003). Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. *Environmental Science & Policy*, 6, 129-137.

Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 108 (1), 24.

ONU-CEPAL (Organización de las Naciones Unidas-Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2007). *Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe*. Chile.

Pongrazc, R; Bartholy, J. & Dezso, Z. (2006). Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*, 37 (12), 2191-2196.

Rosenzweig, C.; Solecki, W.D.; Parshall, L. Chopping, M.; Pope, G. & Goldberg, R. (2005). Characterizing the urban heat island in current and future climates in new jersey. *Environmental Hazards*, 6, 51-62.

Santana, L.M. (2007). Landsat ETM+ image applications to extract information for environmental planning in a Colombian city. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (19), 4225-4242.

Santana, L.M.; Escobar, L.A. & Capote, P. (2009). Dinámica de la ocupación del suelo en la ciudad de Cali, entre 1984 y 2003, usando imágenes de satélite. *Revista El Hombre y la Máquina*, 33 34-44.

Small, C. (2002). Multitemporal analysis of urban reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 81, 427-442.

Tran, H.; Uchiyama, D.; Ochi, S. & Yasuoka, Y. (2005). Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8 (1), 34-48.

Voogt, J.A. & Oke, T.R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370-384.

Weng, Q. (2001). A remote sensing GIS evaluation or urban expansion and its impact on surface temperature en the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 23, 2595-2608.

Weng, Q; Lu, D.; & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperaturevegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89, 467-483.

Weng, Q. & Yang, S. (2004). Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, 70, 145-156.

Wilson, J.S.; Clay, M.; Martin, E. Stuckey, D. & Vedder-Risch, K. (2003). Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems wit remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 86, 303-321.

Zha, Y.; Gao, J. & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594.